

Optimización de Procesos de Inducción de Tensiones Residuales en Compresión en Materiales Metálicos por Ondas de Choque Generadas por Láser

M. Morales, J.A. Porro, C. Molpeceres,
A. García-Beltrán, N. Acebal, J.L. Ocaña

*Centro Láser UPM. Universidad Politécnica de Madrid. Campus Sur UPM.
Edificio La Arboleda Ctra. de Valencia, km. 7,300. 28031 Madrid. SPAIN
Tel.: (+34) 913365540, email: miguel.morales@upm.es*

Resumen

El tratamiento superficial mediante ondas de choque generadas por láser (LSP) se basa en la aplicación de un pulso láser de alta intensidad ($I > 1 \text{ GW/cm}^2$; $\tau < 50 \text{ ns}$) en la superficie de un blanco metálico provocando la vaporización súbita de su superficie y su conversión en un plasma de alta temperatura y densidad que induce la propagación de una onda de choque en el blanco.

El resultado característico del tratamiento consiste en la inducción de un campo de tensiones residuales de compresión en profundidad y que mejoran el comportamiento de la pieza tratada.

En este artículo, se presenta un modelo que permite estudiar la influencia de los distintos parámetros del proceso (irradiancia, radio de la superficie de interacción, duración del pulso, solapamiento entre pulsos distintos, ...).

Palabras Clave: Plasma, Laser Shock Processing, Tratamiento Superficial, Ondas de Choque, Tensiones Residuales, Simulación Numérica.

Abstract

Laser Shock Processing (LSP) is based on the application of a high intensity pulsed Laser beam ($I > 1 \text{ GW/cm}^2$; $\tau < 50 \text{ ns}$) on a metallic target forcing a sudden vaporization of its surface into a high temperature and density plasma that immediately develops inducing a shock wave propagating into the material.

The main acknowledged advantages of LSP consist on its capability of inducing a relatively deep compression residual stresses field into metallic alloy pieces allowing an improved mechanical behaviour.

In this paper, a model that allows the study of the effect of the main parameters of the process (laser intensity, spot radius, pulse length, overlapping of shots, ...) is presented..

Keywords: Plasma, Laser Shock Processing, Surface Treatment, Shock waves, Residual stress, Numerical Modeling.

1. Introducción

El tratamiento superficial mediante ondas de choque generadas por láser (LSP) se está consolidando como una tecnología efectiva para mejorar las propiedades superficiales y la resistencia a la corrosión de los materiales metálicos y actualmente se encuentra en desarrollo su implementación con la adecuada fiabilidad necesaria para su realización práctica dentro de los procesos de fabricación [1].

Sin embargo, aunque existe importante trabajo experimental para estudiar las condiciones óptimas de aplicación del tratamiento [2-4], se han realizado pocos intentos de comprender las características físicas del proceso y de desarrollar un sistema predictivo del mismo [5-7]. Adicionalmente, existen trabajos relevantes en la línea de predecir las mejoras mecánicas inducidas en los procesos de LSP [8-10].

Una razón fundamental para la ausencia de esta capacidad predictiva en los procesos de LSP es su inherente complejidad física, fundamentalmente debida a la coexistencia de diferentes fases materiales (incluyendo plasma) que evolucionan e interaccionan bajo la acción de un haz láser de alta intensidad.

En este artículo, se presenta una revisión de los procesos físicos dominantes en los tratamientos de LSP y el modelo computacional desarrollado que permite estudiar la influencia de los distintos parámetros del proceso (irradiancia, radio de la superficie de interacción, duración del pulso, solapamiento entre pulsos distintos, ...).

2. Fundamentos Físicos de los Procesos de LSP

El tratamiento superficial mediante ondas de choque generadas por láser (LSP) se basa en la aplicación de un pulso láser de alta intensidad ($I > 1 \text{ GW/cm}^2$; $\tau < 50 \text{ ns}$) en la superficie de un blanco metálico provocando la vaporización súbita de su superficie y su conversión en un plasma de alta temperatura y densidad que induce la propagación de una onda de choque en el blanco.

Inicialmente, mientras el pulso laser no ha finalizado, su energía se deposita en la interfaz entre el blanco metálico y el medio que le rodea (generalmente un medio transparente que confina el plasma e incrementa la presión del mismo). La presión generada por el plasma induce dos ondas de choque que se propagan en sentido opuesto (una en el blanco metálico y otra en el medio confinante). Debido al movimiento del material tras las ondas de choque la interfaz se ensancha. Una vez el pulso láser finaliza la presión del plasma decrece mientras se va expandiendo. Finalmente, para tiempos

superiores, después de la recombinación completa del plasma, la expansión del gas caliente prolonga la cantidad de movimiento que se aplica al material durante el tratamiento.

La presión inducida por la onda de choque en el blanco metálico es la responsable de la inducción de la deformación permanente en el mismo. Esta presión debe ser optimizada en función de los parámetros del láser (longitud de onda, duración del pulso, energía) y del proceso (tamaño de la mancha focal, naturaleza y espesor del recubrimiento y del medio confinante).

La descripción de los fenómenos relevantes de absorción láser se hace muy complicado debido a los procesos no lineales presentes durante la interacción y que alteran de forma significativa la dinámica del choque. Estos incluyen la ionización, la dinámica de la población electrónica (que modifica las propiedades de absorción), los flujos térmicos, los hidrodinámicos y, eventualmente, la generación de campos electromagnéticos y el transporte de energía por partículas supratérmicas. Además, desde un punto de vista práctico, el efecto de la ruptura dieléctrica del medio confinante tiene un efecto muy pernicioso para el proceso [11] por lo que debe evitarse.

3. Modelo Numérico para el Análisis Predictivo de los Procesos de LSP

El estudio de los procesos que tienen lugar precisa de una descripción en tres niveles con una adecuada intercomunicación de la información obtenida en cada uno de ellos de una manera auto consistente desde el punto de vista físico.

La descripción en tres niveles incluye:

- i) Análisis de la dinámica de la población electrónica del plasma, incluyendo los fenómenos que dan lugar a la ruptura dieléctrica del medio confinante,
- ii) Simulación de la hidrodinámica que tiene lugar por la expansión del plasma entre el blanco metálico y el medio confinante,
- iii) Análisis de la propagación y la inducción de cambios estructurales permanentes por la evolución de las ondas de choque en el blanco metálico.

Un modelo numérico que trata estos diferentes aspectos ha sido desarrollado por los autores. El modelo desarrollado SHOCKLAS está integrado por tres módulos denominados HELIOS, LSPSIM y HARDSHOCK, y han sido concebidos para el análisis del problema de la generación y propagación de ondas de choque bajo tres

planteamientos diferentes pero intercomplementarios [7,10]. En la figura 1 se muestra esquemáticamente la conexión entre los distintos módulos.

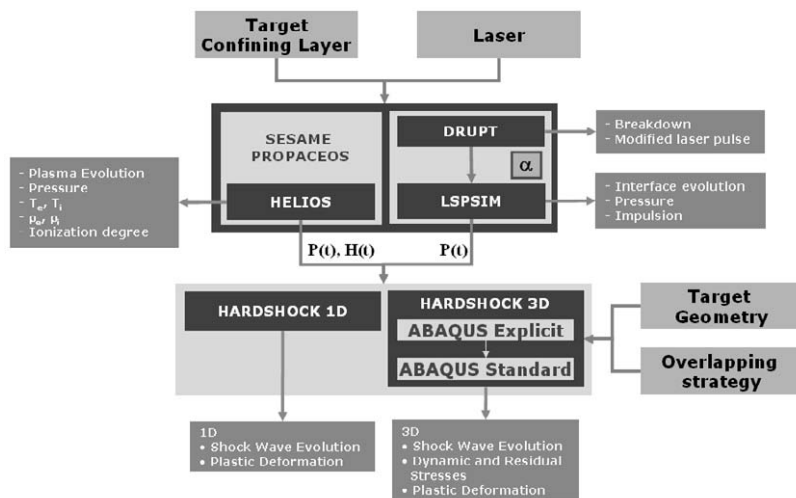


Figura 1. Esquema del sistema SHOCKLAS para el estudio de los procesos de LSP

HELIOS es un código radiativo-magnetohidrodinámico unidimensional que se emplea para la simulación de la evolución de los plasmas creados por láser [12]. HELIOS resuelve las ecuaciones Lagrangianas de hidrodinámica en geometría plana, cilíndrica o esférica para un fluido. Los electrones e iones se mueven conjuntamente. La presión se calcula teniendo en cuenta las contribuciones de los electrones, iones, radiación y campo magnético. El transporte de energía en el plasma puede tratarse mediante el modelo de una temperatura ($T_i = T_e$) o de dos temperaturas ($T_i \neq T_e$). Se considera que electrones e iones tienen distribuciones Maxwellianas definidas por sus respectivas temperaturas, T_i y T_e . La ecuación de estado de los materiales puede basarse en tablas SESAME [13] o PROPACEOS [12]. Las opacidades se basan en datos multi-grupos tabulados PROPACEOS. Los términos de emisión y absorción de radiación se encuentran acoplados a la temperatura electrónica. La energía láser depositada se calcula mediante un modelo de Bremsstrahlung inverso, con la restricción de que la energía no atraviesa la superficie crítica.

LSPSIM es un modelo unidimensional para la estimación de la presión aplicada al blanco en los procesos de LSP [7,10]. Analiza la interfaz entre el medio confinante y el blanco, para ello resuelve las ecuaciones acopladas de energía y cantidad de movimiento imponiendo las condiciones termoflúidicas dadas por la deposición de

energía láser. En este modelo la fracción de energía del laser empleada en procesos de ionización es dato experimental y promediado.

A partir del pulso de presión calculado con HELIOS o LSPSIM, HARDSHOCK resuelve el problema de la propagación de las ondas de choque en el blanco metálico teniendo en cuenta su respuesta termo-mecánica a la propagación de la onda de choque (es decir, efectos como su comportamiento elasto-plástico, cambios de fase, ...). Para ello se emplea una versión tridimensional basada en el código comercial ABAQUS de elementos finitos. La estrategia de cálculo utiliza integración explícita para los primeros instantes de la interacción, es decir, mientras la onda produce deformaciones plásticas y continua con una integración implícita para alcanzar el estado final de equilibrio. El blanco está sometido al calentamiento producido por la interacción directa con el haz láser (que se incluye como un flujo térmico superficial) y por el calentamiento producido por la deformación plástica (que se incluye como un flujo térmico por unidad de volumen y es debido a la disipación inelástica). Este calentamiento produce una expansión térmica local que modificará las deformaciones del mismo y que por lo tanto deben calcularse de forma consistente. La geometría tridimensional empleada se ajusta a las condiciones experimentales. El elemento empleado para la simulación mecánica es el denominado C3D8R un elemento de 8 nodos con control hourglass e integración reducida.

4. Resultados Numéricos

La aplicación del citado conjunto de módulos permite la evaluación del estado tensional y de deformación final de la pieza tratada, así como el análisis de la influencia de los distintos parámetros característicos del proceso y su apropiado diseño con vistas a la optimización del mismo.

En la figura 2 se muestra la densidad iónica y la temperatura iónica obtenidas con el código HELIOS en un tratamiento típico de LSP de Al2024 empleando agua como medio confinante. Puede observarse la propagación de las ondas de choque en el agua y en el blanco metálico (izquierda) y la propagación del plasma (derecha).

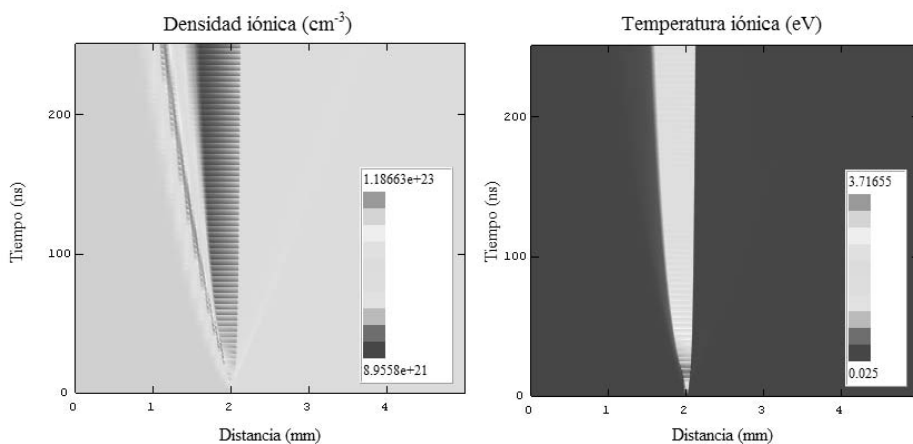


Figura 2. Densidad y temperatura iónica obtenida con el código HELIOS

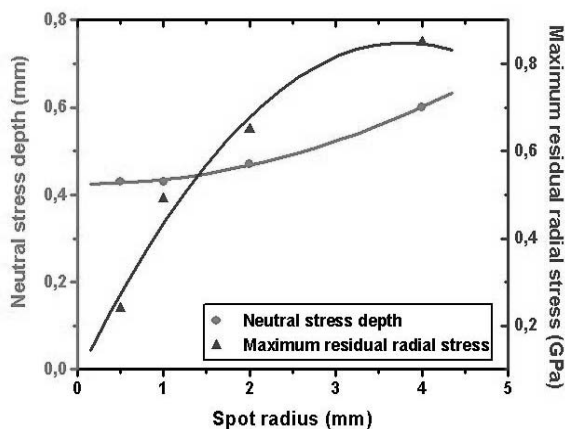


Figura 3. Optimización del tratamiento variando el tamaño de la mancha focal manteniendo la energía del pulso constante.

La optimización de los distintos parámetros del proceso se realiza utilizando la presión y el flujo térmicos calculados con HELIOS o LSPSIM como condiciones de contorno que se aplicaran en la superficie del blanco en el código de elementos finitos HARSHOCK. En la figura 3 se muestra un ejemplo de optimización.

En la Figura 4 se comparan los resultados de la medida experimental de tensiones residuales con los resultados obtenidos mediante la simulación del proceso a través del sistema de cálculo SHOCKLAS.

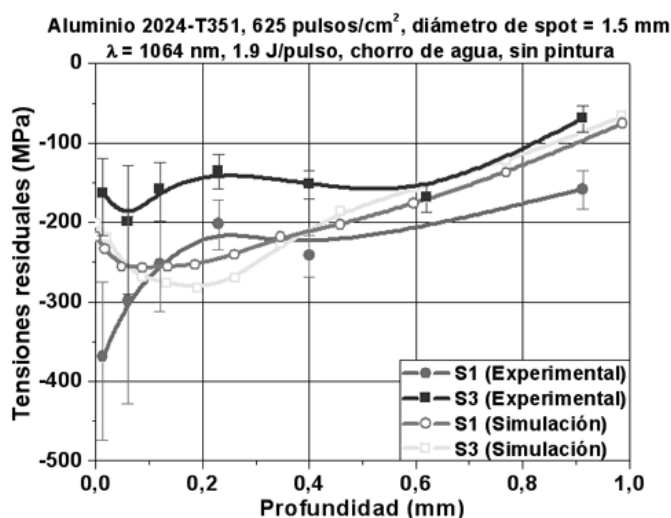


Figura 4. Comparativa de las tensiones residuales experimentales y las obtenidos mediante simulación a través del sistema de cálculo SHOCKLAS

5. Discusión

Los complejos fenómenos presentes en los procesos de LSP debido a la coexistencia de diferentes fases materiales (incluyendo plasma) que evolucionan e interaccionan bajo la acción de un haz láser de alta intensidad y la necesidad de un control del proceso en las aplicaciones prácticas hace necesario el desarrollo de un modelo teórico/computacional que permita estudiar los distintos fenómenos presentes y el resultado final del mismo.

En este artículo se ha presentado el sistema SHOCKLAS que permite estudiar el proceso de una forma global, desde la generación del plasma hasta la determinación de las tensiones residuales en la pieza. Este sistema permite optimizar el proceso para facilitar su implementación práctica.

6. Referencias

1. B.P. Fairand, B.A. Wilcox, W.J. Gallagher and D.N. Williams, Journal of Applied Physics, 43 (1972), 3893.
2. Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, M. Obata, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B, 121 (1997) 432.
3. P. Peyre, P. Merrien, H.P. Lieurade, and R. Fabbro, Surface Engineering, 11 (1995) 47.
4. J.L. Ocaña, C. Molpeceres, J.A. Porro, G. Gómez and M. Morales, Appl. Surf. Sci., 238 (2004) 501.

5. R.D. Griffin, B.L. Justus, A.J. Campillo and L.S. Goldberg, *Journal of Applied Physics*, 59, (1986) 1968.
6. L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, L. Toller, and E. Bartnicki, *Journal of Applied Physics*, 82 (1997) 2826.
7. J.L. Ocaña, C. Molpeceres, M. Morales and A. García-Beltrán, in C.R. Phipps, M. Niino (Eds), *High-Power Laser Ablation II SPIE Proceedings*, Vol. 3885, 2000, p. 252.
8. W. Braisted, R. Brockman, *International Journal of Fatigue*, 21 (1999) 719.
9. W. Zhang and Y.L. Yao, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124 (2002) 369.
10. J.L. Ocaña, M. Morales, C. Molpeceres and J. Torres, *Appl. Surf. Sci.*, 238 (2004) 242.
11. D. Devaux, R. Fabbro, L. Toller and E. Bartnicki, *Journal of Applied Physics*, 74 (1993) 2268.
12. J. J. MacFarlane, I. E. Golovkin, and P. R. Woodruff, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 99 (2006) 381.
13. S.P. Lyon and J.D. Johnson . “SESAME: The Los Alamos National Laboratory Equation of State Database”. Technical report, LA-UR-92-3407, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1992.

7. Agradecimientos

Trabajo subvencionado parcialmente por MCYT (España; Proyecto DPI2005-09152-C02-01) y EADS-España.